

Аэрокосмический научный журнал

Сетевое научное издание
МГТУ им. Н.Э. Баумана
<http://aerospjournal.ru>

Ссылка на статью:

// Аэрокосмический научный журнал.
МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016.
№ 06. С. 15–25.

DOI: [10.7463/aersp.0616.0851796](https://doi.org/10.7463/aersp.0616.0851796)

Представлена в редакцию: 16.10.2016

Исправлена: 30.10.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 681.5

Гидравлические механизмы подъема для установочных агрегатов

Новожилов Б. М.^{1,*}

^{*}boris.m.novozhilov@yandex.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Статья посвящена выбору конструктивных схем гидравлического механизма подъема в составе установочного агрегата, осуществляющего перевод ракеты космического назначения в вертикальное положение и ее установку на стартовый стол. Показаны базовые схемы гидравлического механизма подъема, которые нашли широкое применение в ракетно-космической технике и послужили основой для создания более сложных механизмов подъема для установочных агрегатов. Приведены основные расчетные соотношения кинематики базовых механизмов, позволяющие связать между собой конструктивные параметры установочного агрегата и применяемые в подъемном механизме гидроцилиндры. Акцент в статье сделан на актуальной задаче разработки гидравлических механизмов подъема для установщиков ракет тяжелого класса. Показаны схемы двух составных механизмов, предназначенных для подъема таких ракет в вертикальное положение с помощью двух силовых гидроцилиндров, которые включаются в работу последовательно, выполняя только часть полного поворота стрелы. Статья представляет интерес для разработчиков подъемно-установочного оборудования стартовых комплексов, а также для учащихся старших курсов соответствующих специальностей.

Ключевые слова: космические стартовые комплексы, установочное оборудование, гидравлический механизм подъема, гидроцилиндр

В России принята технология подготовки и запуска ракет космического назначения (РКН), предусматривающая горизонтальную сборку носителя на технической позиции с последующей его транспортировкой на стартовую позицию и установкой в вертикальное положение [1, стр. 152]. Поэтому в состав специального технологического оборудования наземной инфраструктуры космодромов входит установочное оборудование. Оно выполняет установку РКН на стартовую систему и ее снятие в случае несостоявшегося пуска. Транспортно-установочное оборудование кроме указанных операций выполняет доставку РКН на стартовую позицию.

Конструкция установочного оборудования в значительной мере зависит от типа ракетного комплекса, класса ракеты и способа установки ее в положение для пуска. В ракетно-космической технике применение нашли исключительно установочные агрегаты с

подъемной стрелой. Перевод стрелы в вертикальное положение и обратно осуществляется в таких агрегатах гидравлическим механизмом подъема (ГМП). Его основным элементом является гидроцилиндр со штоком, осуществляющим возвратно-поступательное движение при подаче в цилиндр рабочей жидкости от насосной станции. Преобразование поступательного движения штока гидроцилиндра в угловое перемещение относительно неподвижной оси поворота осуществляется стрелой установочного агрегата. Подобные механизмы подъема применяются везде, где требуется обеспечить перемещение крупногабаритных грузов или создавать большие усилия при малых габаритах и массе привода.

На рис. 1, а показана базовая схема ГМП, содержащего один гидроцилиндр. Такой механизм является основой сложных механизмов подъема, содержащих более одного гидроцилиндра.

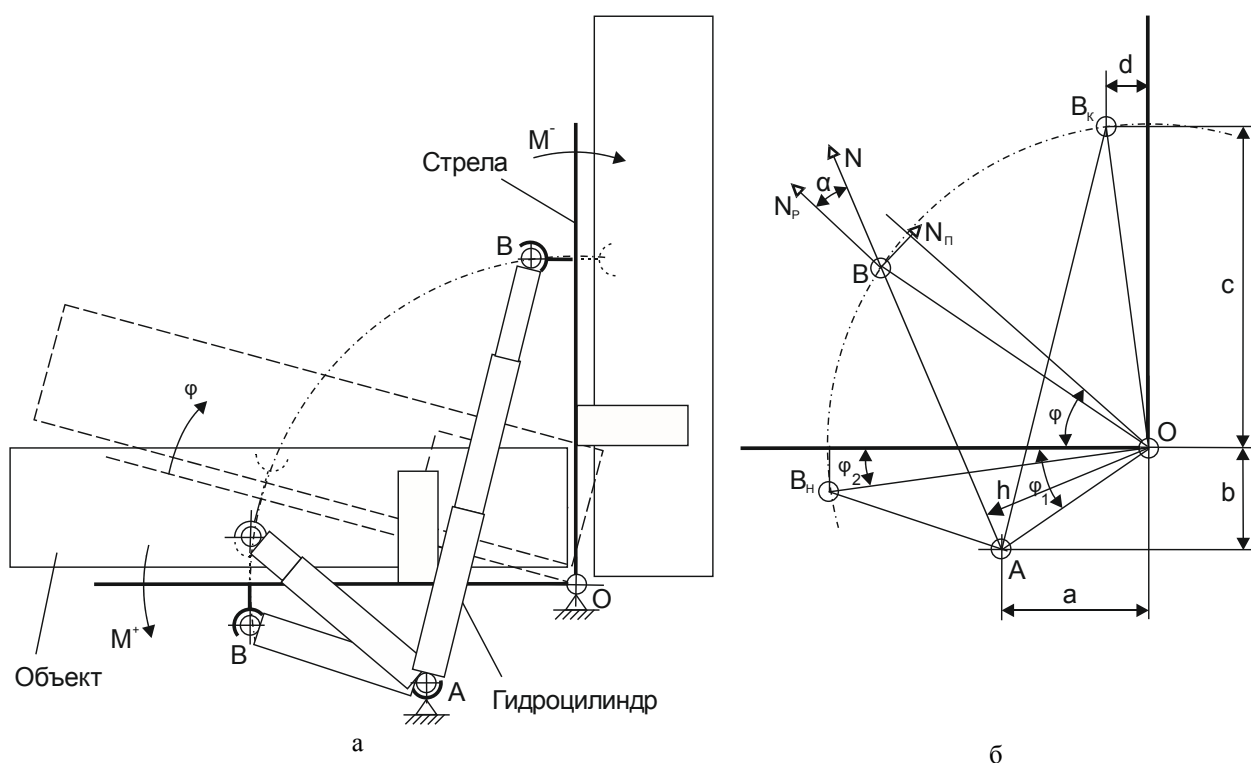


Рис. 1. Базовая схема ГМП (вариант 1): а – конструктивная схема; б – расчетная схема.

Гидроцилиндр механизма подъема одним концом закреплен на неподвижном основании (например, на раме транспортного агрегата), другим концом – на стреле, представляющей собой продольную балку обычно коробчатого сечения. Крепление гидроцилиндра в составе механизма подъема должно исключать передачу изгибающего усилия на его шток применением сферических шарниров или шарниров Гука.

В начальном положении шток гидроцилиндра убран и стрела с закрепленным на ней объектом (РКН) занимает горизонтальное положение. Сила тяжести поднимаемого объекта создает грузовой момент M^+ относительно оси поворота стрелы. Этот момент создает сжимающее усилие на штоке гидроцилиндра, которое тот преодолевает при подаче рабо-

чей жидкости в его поршневую полость, поворачивая стрелу на угол φ . В конце подъема, когда объект принимает вертикальное положение, грузовой момент M создает растягивающее усилие на штоке гидроцилиндра, которое воспринимается давлением рабочей жидкости в штоковой полости гидроцилиндра. В общем случае рабочий ход гидроцилиндра в составе механизма подъема превышает его начальную длину, т. е. гидроцилиндр является телескопическим.

Крепление гидроцилиндра к стреле может быть ниже или выше продольной оси стрелы (на рис. 1, а показано пунктирной линией). В последнем случае механизм подъема может содержать два гидроцилиндра, размещаемых по бокам агрегата, а стрела будет представлять собой две балки, соединенные между собой поперечинами.

Расчетная схема механизма подъема с одним гидроцилиндром показана на рис. 1, б. В прямоугольной системе координат положение характерных точек механизма определяется их координатами относительно оси поворота стрелы: a и b – координаты нижней точки крепления гидроцилиндра; c и d – координаты верхней точки крепления гидроцилиндра. Угловые координаты указанных точек обозначаются углом φ с соответствующим индексом. Угол поворота стрелы φ отсчитывается от ее горизонтального положения.

При проектировании механизма определяют параметры гидроцилиндра (начальную длину, рабочий ход, количество ступеней) и координаты его точек крепления на агрегате. При этом учитываются ограничения, определяемые компоновкой механизма в составе агрегата и силовыми параметрами гидроцилиндра (усилием на штоке и рабочим давлением).

Если обозначить текущую длину гидроцилиндра через L , то на основании теоремы косинусов для треугольника можно записать:

$$L(\varphi)^2 = a^2 + b^2 + c^2 + d^2 - 2\sqrt{a^2 + b^2} \cdot \sqrt{c^2 + d^2} \cdot \cos(\varphi + \varphi_1 - \varphi_2), \quad (1)$$

где $\varphi_1 = \arctg \frac{b}{a}$ и $\varphi_2 = \arctg \frac{d}{c}$

Из (1) следует, что начальная длина цилиндра ($\varphi = 0$):

$$L_H = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 - 2\sqrt{a^2 + b^2} \cdot \sqrt{c^2 + d^2} \cdot \cos(\varphi_1 - \varphi_2)} \quad (2)$$

конечная длина ($\varphi = 90^\circ$):

$$L_K = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + 2\sqrt{a^2 + b^2} \cdot \sqrt{c^2 + d^2} \cdot \sin(\varphi_1 - \varphi_2)} \quad (3)$$

По формулам (2) и (3) вычисляют длину рабочего хода гидроцилиндра для выбранных координат его крепления и уточняют найденное значение по ряду стандартных значений (ГОСТ 6540-68) с корректировкой координат крепления.

Усилие на штоке гидроцилиндра определяется плечом подъема h , которым он воспринимает грузовой момент M . Величину h можно легко определить из формул вычисления площади треугольника S . С одной стороны, $S = h \cdot L/2$, с другой (по формуле Герона) – $S = \sqrt{p(p-A)(p-B)(p-C)}$, где $p = (A+B+C)/2$; A, B, C – стороны треугольника.

Подстановка в эти формулы $A = L(\varphi)$, $B = \sqrt{a^2 + b^2}$, $C = \sqrt{c^2 + d^2}$ позволяет определить зависимость плеча подъема h от угла поворота стрелы φ . Далее при известном грузовом моменте, зная плечо h , можно легко определить усилие на штоке гидроцилиндра N .

Усилие на штоке N можно также вычислить, если разложить его на две составляющие: силу подъема $N_{\text{п}}$, действующую поперек балки стрелы, и продольную силу $N_{\text{пр}}$, действующую вдоль балки стрелы и растягивающую ее. Из условия равенства грузового и движущего моментов следует, что

$$M = N \cdot h \text{ или } M = N_{\text{п}} \cdot c = N \cdot c \cdot \sin \alpha.$$

Текущее значение угла α можно определить по теореме синусов для $\triangle OAB$ (см. рис. 1, б). Конечная формула имеет следующий вид:

$$\alpha = \arctg \frac{D \cdot \sin \varphi_2 - \sin(\varphi + \varphi_1)}{\cos(\varphi + \varphi_1) - D \cdot \cos \varphi_2}, \text{ где } D = \sqrt{(c^2 + d^2) / (a^2 + b^2)}. \quad (4)$$

Если верхняя точка крепления гидроцилиндра расположена выше средней линии стрелы (сдвоенный механизм с боковым расположением цилиндров), то формулы (1) и (4) принимают следующий вид:

$$L(\varphi)^2 = a^2 + b^2 + c^2 + d^2 - 2\sqrt{a^2 + b^2} \cdot \sqrt{c^2 + d^2} \cdot \cos(\varphi + \varphi_1 + \varphi_2), \quad (5)$$

$$\alpha = \arctg \frac{D \cdot \sin \varphi_2 + \sin(\varphi + \varphi_1)}{D \cdot \cos \varphi_2 - \cos(\varphi + \varphi_1)}. \quad (6)$$

По рассмотренной схеме выполнен механизм подъема стационарного установочного агрегата РКН тяжелого класса Протон [2, стр. 143].

При выборе компоновочной схемы ГМП интерес представляет значение угла α при горизонтальном положении стрелы, когда грузовой момент имеет максимальное значение. Положив в (4) $\varphi = 0$ и $\varphi_2 = 0$ ($d = 0$), получим значение начального угла наклона гидроцилиндра:

$$\alpha_{\text{н}} = \arctg \frac{b}{c - a}$$

Эта функция имеет максимум при $c = a$, равный 90° . Такое расположение гидроцилиндра позволяет уменьшить площадь его поршневой полости при заданной нагрузке. Однако при этом может оказаться решающим ограничение по начальной длине гидроцилиндра или же потребуются использовать сдвоенный механизм подъема с верхней точкой крепления гидроцилиндров значительно выше средней линии стрелы.

Значениям угла $\alpha > 90^\circ$ соответствует механизм подъема, конструктивная и расчетная схемы которого показаны на рис. 2.

Такая компоновка механизма подъема может оказаться предпочтительной для транспортно-установочных агрегатов (ТУА), у которых в задней части агрегата располагаются узлы ходовой части и опорные устройства (пример – ТУА для РКН среднего класса Союз-2 [3, стр. 74]).

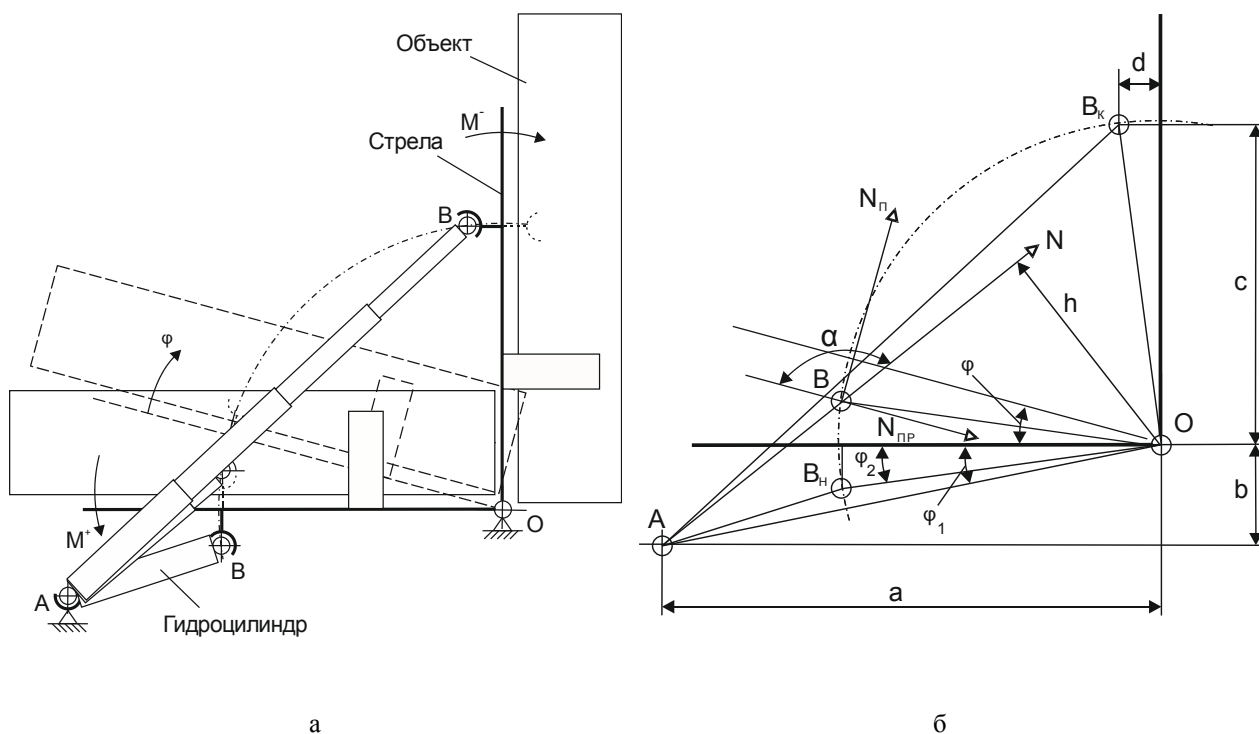


Рис. 2. Базовая схема ГМП (вариант 2): а – конструктивная схема; б – расчетная схема.

К недостаткам такого варианта следует отнести большую длину рабочего хода гидроцилиндра, что влечет за собой увеличение начальной длины цилиндра или увеличение числа его ступеней. Кроме того, для такого расположения гидроцилиндра трудно обеспечить приемлемое значение плеча h при малых углах подъема φ . Действующий в начале подъема стрелы грузовой момент имеет максимальное значение, поэтому необходимо либо поднимать давление в цилиндре, либо увеличивать рабочую площадь его поршневой полости. Если такое решение нежелательно, можно увеличить число гидроцилиндров в механизме подъема, как это сделано, например, в ТУА для РКН Зенит-3 [4]. Можно также уменьшить угол α за счет размещения верхней точки крепления цилиндра выше средней линии стрелы.

При вычислениях длины хода гидроцилиндра в рассматриваемом варианте применимы формулы (1) и (5) для расположения верхней точки крепления гидроцилиндра ниже и выше средней линии стрелы, соответственно. Текущее значение угла подъема α можно вычислить по формуле $\alpha = 180^\circ - \alpha'$, где угол α' определяется по формулам (4) и (6) в зависимости от варианта расположения верхней точки крепления гидроцилиндра.

При проектировании механизма подъема задаются значениями параметров a , b , c и d с учетом конструктивных ограничений. Так значение параметра b может быть ограничено допустимой высотой дорожного просвета транспортного агрегата, и начальный угол наклона гидроцилиндра подъема не обеспечит усилия на штоке, достаточного для преодоления грузового момента в начале подъема. В этом случае можно объединить оба рассмотренных варианта построения механизма подъема в одном механизме. На рис. 3 пока-

зан вариант такого механизма подъема, который применялся в ТУА для ракетных комплексов космического назначения на базе конверсионных ракет шахтного базирования.

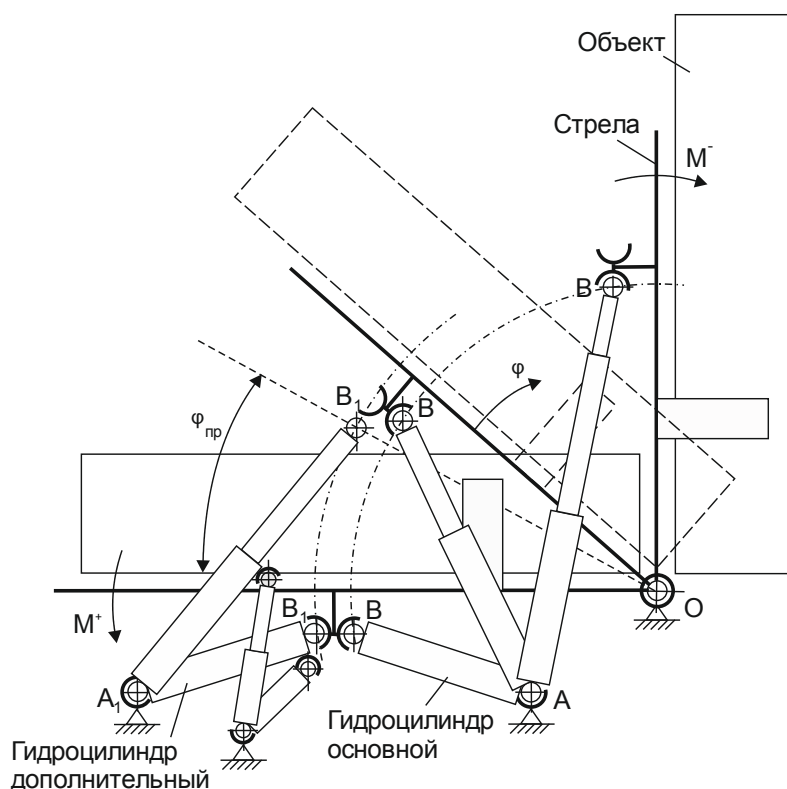


Рис. 3. Механизм подъема с дополнительным гидроцилиндром

Механизм содержит два гидроцилиндра, один из которых является основным и работает в течение всего цикла подъема, а второй (дополнительный) работает только в начале подъема стрелы до некоторого угла $\varphi_{пр}$. В этой точке подъема дополнительный гидроцилиндр отстыковывается и фиксируется в таком положении вспомогательным гидроцилиндром. Далее основной гидроцилиндр завершает подъем стрелы до угла $\varphi = 90^\circ$. Возврат стрелы в исходное положение осуществляется в обратном порядке: опускание стрелы до угла $\varphi_{пр}$, стыковка стрелы с дополнительным цилиндром и опускание стрелы до начального положения на двух цилиндрах. Такой механизм, как и базовые механизмы, можно рассматривать как двухмерный (плоский) механизм.

Проектируют механизм с использованием расчетных зависимостей для базовых схем. Значение угла $\varphi_{пр}$ выбирают в пределах $30...40^\circ$ из условия допустимой нагрузки на шток основного гидроцилиндра при этом угле.

С ростом размеров и массы РКН механизмы подъема в базовом варианте не всегда могут обеспечить выполнение функций их подъема и установки из-за ограничений в размерах применяемых гидроцилиндров, которые являются самым дорогим узлом ГМП. Поэтому для РКН тяжелого класса Н-1 и Энергия были разработаны конструкции ТУА, в ко-

торых базовые схемы механизмов подъема являются только частью более сложных механизмов и выполняют не весь цикл подъема, а только его часть [3, стр. 84, 87].

На рис. 4 показана схема механизма подъема с двумя гидроцилиндрами, в которой гидроцилиндры включаются в работу последовательно.

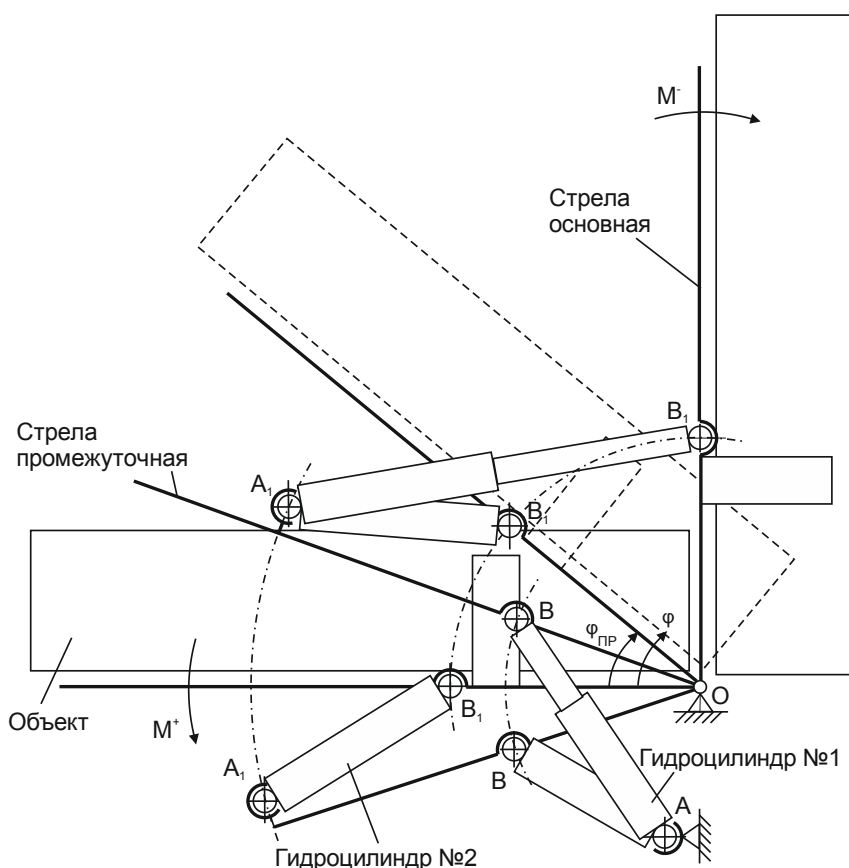


Рис. 4. Механизм подъема с последовательным включением гидроцилиндров (вариант 1)

В состав механизма входят две стрелы – основная, на которой закреплен поднимаемый объект, и промежуточная, соединенная с основной стрелой гидроцилиндром. Обе стрелы имеют общую ось поворота – точку O.

Для подъема объекта сначала включается гидроцилиндр №1. При полном выходе штока он поднимает основную стрелу до угла $\varphi_{пр}$ и фиксируется в этом положении. Доводка основной стрелы до вертикального положения осуществляется гидроцилиндром №2, который развивает усилие на штоке относительно своей нижней точки крепления на промежуточной стреле, зафиксированной гидроцилиндром №1.

Порядок включения гидроцилиндров может быть изменен. Но в любом случае гидроцилиндр, включающийся первым, должен иметь возможность фиксации штока в конечном положении. На выбор значения $\varphi_{пр}$ в таком механизме влияют не только силовые факторы, но и технологические ограничения.

В отличие от рассмотренных выше механизмов ГМП с последовательным включением гидроцилиндров является пространственным (трехмерным), что усложняет его компоновку в составе ТУА.

Следует отметить, что механизм по рис. 4 может быть выполнен и с отдельными осями для основной и промежуточной стрел. Однако в этом случае верхняя точка крепления гидроцилиндра №1 должна иметь возможность продольного перемещения по промежуточной стреле, что не всегда выполнимо.

На рис. 5 показана еще одна схема подъемного механизма с двумя гидроцилиндрами, включаемыми последовательно. Здесь нет промежуточной стрелы, как в предыдущей схеме, но предусмотрен поворотный рычаг, шарнирно закрепленный на стреле, а сам механизм также является пространственным.

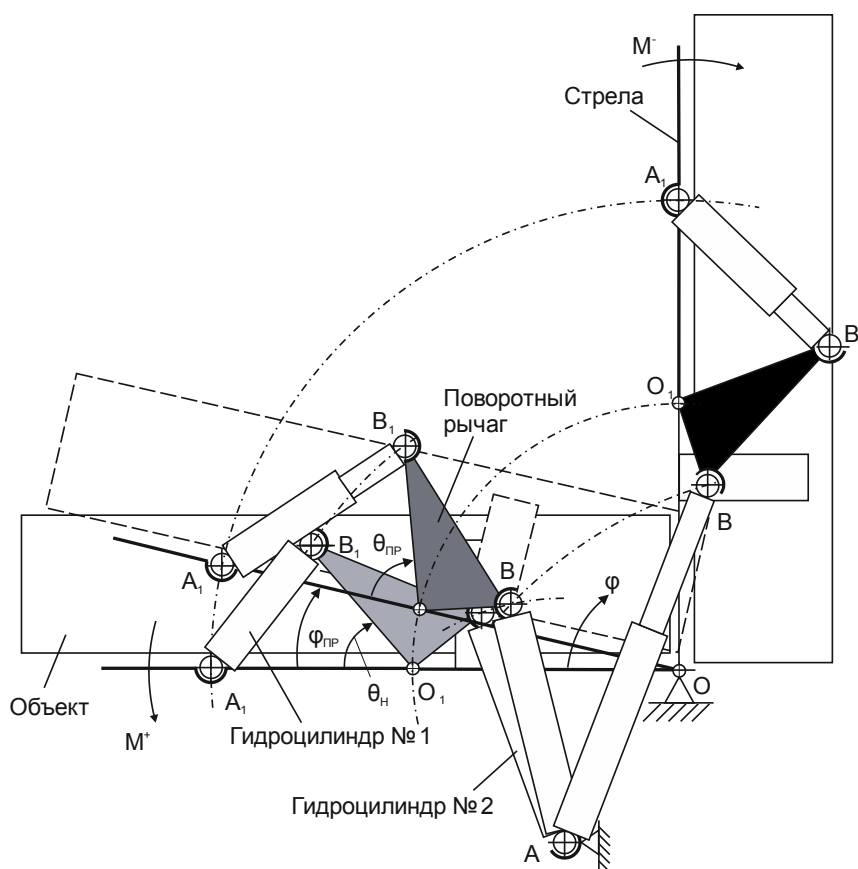


Рис. 5. Механизм подъема с последовательным включением гидроцилиндров (вариант 2)

Перед началом цикла подъема поворотный рычаг O_1B_1B образует со стрелой начальный угол θ_H , определяемый начальной длиной гидроцилиндра №1. Указанный гидроцилиндр включается в начале подъема и при полном выходе штока поднимает стрелу на угол $\varphi_{пр}$, опираясь на гидроцилиндр №2. При этом поворотный рычаг поворачивается и фиксируется гидроцилиндром №1 на угле $\theta_{пр}$, образуя жесткую связь со стрелой, а гидро-

цилиндр №2 поворачивается на небольшой угол. Последующее включение гидроцилиндра №2 завершает поворот стрелы до 90° . Опускание стрелы происходит в обратном порядке.

Для правильной работы рассмотренного механизма важно, чтобы поворотный рычаг в конце своего движения относительно стрелы обеспечивал жесткую связь по линии A_1B_1BA . Здесь, как и в предыдущей схеме, порядок включения цилиндров в работу может быть изменен.

Оба последних рассмотренных механизма в силу своей пространственной конструкции должны выполняться в сдвоенном варианте с расположением поднимаемого объекта между ними. Их проектирование ведут с использованием расчетных соотношений, полученных для базовых схем ГМП. Механизмы имеют по несколько конструктивных параметров, варьируя которые можно спроектировать механизм с требуемыми свойствами, например, с одинаковыми гидроцилиндрами стандартных размеров или телескопическими гидроцилиндрами с минимальным числом ступеней.

Результаты проведенного анализа показывают, что с использованием базовых схем ГМП можно создавать установочные агрегаты для РКН любого класса.

Список литературы

1. Теория и практика эксплуатации объектов космической инфраструктуры. Т.1: Объекты космической инфраструктуры. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 400 с.
2. Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники. Кн. 1 / Под ред. И.В. Бармина. Москва: Полиграфикс РПК, 2005. 416 с.
3. Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники. Кн. 2 / Под ред. И.В. Бармина. Москва: Полиграфикс РПК, 2006. 375 с.
4. Ракета-носитель Зенит-2. Режим доступа:
http://russpace.ucoz.ru/index/raketa_nositel_zenit/0-44

Hydraulic Lifting Mechanisms for the Erection Equipment

B.M. Novojilov^{1,*}

^{*}boris.m.novozhilov@yandex.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: space launching complexes, installation equipment, hydraulic mechanism of lifting, hydro-cylinder

In erection equipment of space launch complexes the hydraulic lifting mechanisms (HLM) are solely and exclusively used to accomplish changing the space-mission vehicle (SMV) position from horizontal to the vertical one. Existing designs of lifting mechanisms are diverse, but all of them basically contain a basic mechanism comprising one hydro-cylinder. With increasing SMV size and weight a task to design the more complicated lifting mechanisms, comprising more kinematic links and using several hydro-cylinders becomes urgent.

The article conducts a detailed analysis of the basic HLM schemes and defines the features of their arrangement in erection equipment. Gives basic calculation relationships, allowing us to determine design parameters of mechanisms for stationary and transport units. Via examples of available erection equipment shows the embodiment of lifting mechanisms using basic schemes.

The ways for development of HLM schemes to erect a SMV of the large size and weight are shown. Two options of the double-cylinder HLM are described. Both schemes are based on dividing a lift cycle into two parts, in each of which only one of the cylinders is in operation. The first option contains an additional, intermediate boom, with respect to which the main boom is erected. In such a mechanism the cylinders start running sequentially: at first, one of the cylinders erects the intermediate boom, then the other cylinder does the main one. The second HLM embodiment comprises a single carrier boom with the swing arm, which allows to swing the boom at a certain angle of less than 90 ° using one of the cylinders, also sequentially operating. The second cylinder allows the boom to fall into vertical position. Such schemes can reduce a stroke length of used hydraulic cylinders, which are the most expensive devices of the lifting mechanism.

The analysis results are of interest to designers of erection equipment for the space launch complexes.

References

1. *Teoriia i praktika ekspluatatsii ob'ektov kosmicheskoy infrastruktury* [Theory and practice of space infrastructure]. *Vol.1: Ob'ekty kosmicheskoy infrastruktury* [The space infrastructure]. S.-Petersburg: BHV-Petersburg, 2006. 400 p.
2. *Tekhnologicheskie ob'ekty nazemnoj infrastruktury raketno-kosmicheskoy tekhniki. Kn.1* [Technological ground infrastructure rocket and space technology. Pt.1] / Ed. by I.V. Barmin. Moscow: Poligraphics RPK Publ., 2005. 416 p.
3. *Tekhnologicheskie ob'ekty nazemnoj infrastruktury raketno-kosmicheskoy tekhniki. Kn.2* [Technological ground infrastructure rocket and space technology. Pt.2] / Ed. by I.V.Barmin. Moscow: Poligraphics RPK Publ., 2006. 375 p.
4. *Raketa-nositel' Zenit-2* [Carrier rocket Zenit-2]. Available at: http://russpace.ucoz.ru/index/raketa_nositel_zenit/0-44